

7. Залкинд И.Я., Троянкин Ю.В. Огнеупоры и шлаки в металлургии. — М.: Металлургиздат, 1964. — 288 с.
8. Залкинд И.Я., Вдовченко В.С. Вязкость и структура шлаковых расплавов при жидком шлакоудалении // Минеральная часть топлива и ее роль в работе энергетических устройств: Матер. Всесоюз. научно-техн. совещ. — Алма-Ата, 1971. — С. 97–105.
9. Михеев В.И. Рентгенометрический определитель минералов. — Т. 1. — М.: Госгеолтехиздат, 1957. — 868 с.
10. Миркин Л.И. Справочник Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. — М.: Физматгиз, 1961. — 863 с.
11. Винчелл А.Н., Винчелл Г. Оптические свойства искусственных минералов. — М.: Мир, 1967. — 526 с.
12. Михеев В.И., Сальдау Э.П. Рентгенометрический определитель минералов. — Т. 2. — Л.: Недра, 1965. — 363 с.
13. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. — 599 с.

УДК 536.24:666.973.2:666.64.492.3:692.2

ДВУМЕРНЫЙ НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В НЕОДНОРОДНОЙ КЕРАМЗИТОБЕТОННОЙ СТЕНЕ

А.Н. Хуторной, А.Я. Кузин, А.В. Колесникова, Н.А. Цветков

Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: kaftgs@tsuab.ru

Разработана конструкция монолитно возводимой керамзитобетонной наружной стены с упорядоченным расположением в толще вертикальных паронепроницаемых составных опалубок с эффективным утеплителем. На основе физико-математической модели численно выполнен параметрический анализ влияния различных факторов на тепловые режимы керамзитобетонной стены. В климатической камере объемом 58 м³ проведено экспериментальное исследование полей температуры и теплозащитных свойств фрагмента стены размером 2×2×0,3 м. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета и эксперимента по температурным полям и плотностям тепловых потоков, что позволяет рекомендовать к практическому использованию разработанную численную методику.

В работе [1] показано преимущество использования монолитно возводимых керамзитобетонных наружных стен зданий с вертикальными пустотами, заполненными утеплителем [2]. Предложенный способ утепления позволяет повысить теплозащитные свойства стены на 30...50 % и уменьшить ее массу на 20 %. Для исключения возможности образования зоны конденсации в слое утеплителя внутреннюю опалубку можно выполнять из паронепроницаемых, например, полимерных материалов, а стыки ее составных элементов герметизировать высокоадгезионным материалом.

Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей процессов теплопереноса в таких неоднородных конструкциях чрезвычайно важны для обоснования предложенного способа повышения их теплозащитных свойств, особенно при строительстве в Сибири.

Рассмотрим теплоперенос через плоскую неоднородную систему, состоящую из керамзитобетона 1 с осевым отверстием, заполненным утеплителем 2 (рис. 1). Форма керамзитобетона и утеплителя — прямые параллелепипеды, поперечные сечения которых — квадраты со сторонами d_1 и d_2 соответственно. Известны теплофизические характеристики (ТФХ) ($\lambda_i, \rho_i, c_i, i=1,2$) материалов системы, ее геометрические размеры, температуры наружной ($t_{g,e}$) и внутренней ($t_{g,ins}$) сред, коэффициенты теплоотдачи на наружной (α_w) и внутренней (α_0) поверхностях ограждения.

Необходимо рассчитать поля температур и плотностей тепловых потоков в поперечном сечении неоднородной керамзитобетонной стены.

Теплоперенос в поперечном сечении неоднородного керамзитобетонного фрагмента стены в областях 1 и 2 описывается двумерными нелинейными нестационарными уравнениями теплопроводности

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y} \right), \quad i=1,2, \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$t_i|_{\tau=0} = t_{in}(x, y), \quad i=1,2; \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{g,ins} - t_0); \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_k} = \alpha_w (t_{g,e} - t_w); \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=Y_k} = 0; \quad (6)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_1} = t_2 \Big|_{x=X_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_1}, Y_1 \leq y \leq Y_2; \quad (7)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_2} = t_2 \Big|_{x=X_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2}, Y_1 \leq y \leq Y_2; \quad (8)$$

$$t_1|_{y=Y_1} = t_2|_{y=Y_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y}|_{y=Y_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y}|_{y=Y_1}, X_1 \leq x \leq X_2; \quad (9)$$

$$t_1|_{y=Y_2} = t_2|_{y=Y_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y}|_{y=Y_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y}|_{y=Y_2}, X_1 \leq x \leq X_2, \quad (10)$$

где t_{in} – температура в начальный момент времени, °C; $t_{g,e}$, $t_{g,ins}$ – температуры наружного и внутреннего воздуха, °C; t_0 , t_w – температуры на внутренней и наружной поверхностях стены, °C; α_0 , α_w – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м²·K); τ – время, с; x , y – координаты, м; c – коэффициент удельной теплоемкости, Дж/(кг·K); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K); ρ – плотность, кг/м³; X_i ($i=1,2$), Y_i ($i=1,2$) – координаты внутренних границ расчетных подобластей по x и y , м; X_k , Y_k – координаты верхних границ расчетной области по x и y , м.

На границах области $x=0$ и $x=X_k$ задаются условия конвективного теплообмена (3, 4); $y=0$ и $y=Y_k$ – адиабатные условия (5, 6); на внутренних границах системы – условия четвертого рода (7–10).

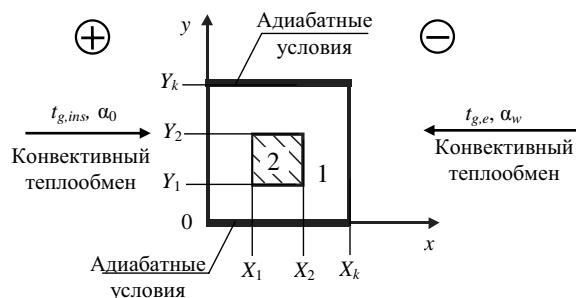


Рис. 1. Расчетная схема неоднородного фрагмента керамзитобетонной стены

В математической модели (1) – (10) нижние индексы 1, 2 характеризуют керамзитобетон и утеплитель.

Для численного решения задачи использовался метод расщепления Н.Н. Яненко [3]. Полученные в результате расщепления одномерные уравнения теплопроводности в однослойных и трехслойных областях в направлениях x и y рассчитывались итерационно-интерполяционным методом [4] с итерациями по коэффициентам с заданной точностью. Решение задачи по изложенному выше алгоритму осуществлялось с помощью программы, разработанной по модульному принципу на языке программирования ФОРТРАН для ПЭВМ.

Для тестирования численного алгоритма и программы вначале была решена двумерная задача теплообмена в однородной керамзитобетонной стене. В результате численных расчетов было установлено, что независимо от задания начального условия, которое варьировалось от -40 до $+20$ °C, численное решение двумерной задачи при $\tau \rightarrow \infty$ стремится к единственному стационарному решению, совпадающему с известным аналитическим решением [5], что является одним из подтверждений достоверности результатов расчетов.

Экспериментальные исследования теплозащитных свойств неоднородной керамзитобетонной сте-

ны проводились в климатической камере объемом 58 м³. Испытываемым фрагментом стены камера разделялась на теплый и холодный объемы по 29 м³ каждый. Для возведения стены была изготовлена деревянная опалубка, на стенках которой для предотвращения вытекания керамзитобетонной смеси была закреплена полиэтиленовая пленка. Опалубка заливалась керамзитобетонной смесью марки М100. Размеры возведенного фрагмента стены составляли $2 \times 2 \times 0,3$ м (рис. 2). Для выполнения стены неоднородной внутрь опалубки перед заливкой были помещены семь полиэтиленовых труб диаметром 0,105 м, заполненные утеплителем (пенопласт).

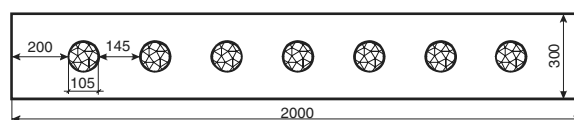


Рис. 2. Экспериментальная схема фрагмента керамзитобетонной неоднородной стены (размеры даны в мм)

Для производства экспериментальных работ использовался измерительный комплекс «Терем – 4.0» производства НПП «Интерприбор» (г. Челябинск). Измерение температур в эксперименте проводилось с помощью 22 хромель-копелевых термопар. Для измерения плотностей тепловых потоков использовались преобразователи теплового потока производства НПП «Интерприбор». На каждую термопару и преобразователь теплового потока в ГП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» получен сертификат соответствия о калибровке средств измерения. Схема расположения термопар в неоднородном фрагменте керамзитобетонной стены и значения температур в местах их установки показаны на рис. 3. Преобразователи тепловых потоков устанавливались на внутренней поверхности стенки: один в плоскости размещения утеплителя, а другой в плоскости, расположенной между теплоизоляционными вставками.

Испытания проводились при температуре в холодной зоне климатической камеры $-15,1 \pm 0,2$ °C, в теплой зоне $25,5 \pm 0,2$ °C. После выхода на стационарный режим теплопередачи для двадцати серий испытаний температура на внутренней поверхности стены составляла $15,6...16,2$ °C в плоскости размещения утеплителя (плоскость I) и $15,2...15,9$ °C – в плоскости между теплоизоляционными вставками (плоскость II). Температура на наружной поверхности составляла $-7,6...8,3$ °C в плоскости I и $-7,4...8,0$ °C – в плоскости II. Измеренные плотности тепловых потоков через испытываемую стену составляли $56,1 \pm 2,7$ Вт/м² в плоскости I и $65,5 \pm 2,9$ Вт/м² – в плоскости II.

Для корректного проведения сопоставительного анализа численное исследование закономерностей теплопереноса в неоднородном керамзитобетонном фрагменте стены проводилось при геометрических и теплофизических данных, соответствующих экспериментальным.

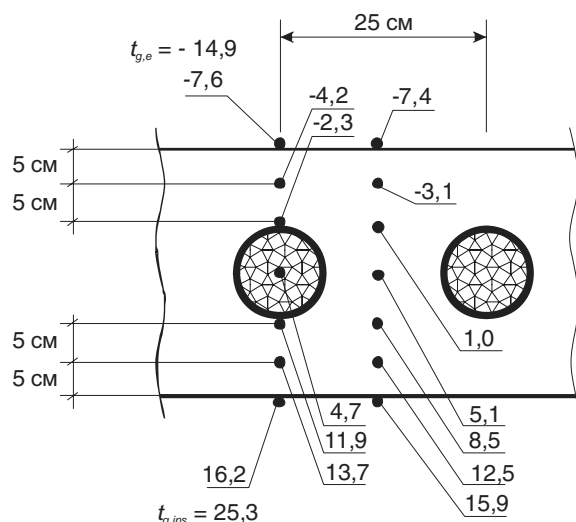


Рис. 3. Схема расположения термопар и значения температур ($^{\circ}\text{C}$) в местах их установки

Значения плотностей и коэффициентов теплопроводности керамзитобетона и утеплителя определялись опытным путем. Для измерения теплопроводности керамзитобетона были изготовлены специальные рамки, в которые заливалась керамзитобетонная смесь. Таким образом, из керамзитобетона и утеплителя было изготовлено по три пары идентичных образцов размерами $100 \times 100 \times 15$ мм. Теплопроводность измерялась на установке, реализующей стационарный метод неограниченного плоского слоя. Исследование теплопроводности образцов проводилось в лаборатории «Испытаний теплофизических свойств материалов», аттестат аккредитации № РОСС RU. 9001. 21.СЛ31, лицензия Госстроя России № 21 СЛ31. Результаты измерений показали, что значения теплопроводности образцов из керамзитобетона составляли $0,87 \pm 0,04$ Вт/(м·К), а из утеплителя — $0,05 \pm 0,002$ Вт/(м·К). Плотность керамзитобетона составляла 1746 кг/м^3 , плотность утеплителя — 42 кг/м^3 . Теплоемкость материалов в численных расчетах бралась из справочных данных: 840 Дж/(кг·K) для керамзитобетона и 1260 Дж/(кг·K) для утеплителя.

Поскольку в эксперименте использовались трубы круглого сечения, а в физико-математической модели теплопереноса — параллелепипеды с квадратными поперечными сечениями, то при выполнении численных расчетов круглое поперечное сечение утепляющей вставки заменялось равновеликим квадратным. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, используемые в расчетах, определялись на основании измеренных плотностей тепловых потоков по формуле [5]

$$\alpha = \frac{q}{t_1 - t_2},$$

где q — измеренная плотность теплового потока, Вт/м²; t_1 , t_2 — температура воздуха и поверхности стены, соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

В таблице представлены результаты расчета и эксперимента по температурам в $^{\circ}\text{C}$, в различных сечениях неоднородной керамзитобетонной стены.

Таблица. Результаты расчета и эксперимента по температурным полям

Метод исследования	Сечение стены	Значение координаты x , м							
		0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	
Численный расчет	плоскость I	16,4	13,5	11,7	4,2	-3,0	-4,9	-7,7	
	плоскость II	16,0	12,6	8,7	4,5	-0,0	-4,0	-7,3	
Эксперимент	плоскость I	16,2	13,7	11,9	4,7	-2,3	-4,2	-7,6	
	плоскость II	15,9	12,5	8,5	5,1	1,0	-3,1	-7,4	

Данные таблицы показывают хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений температуры.

На рис. 4–7 представлены результаты численных расчетов.

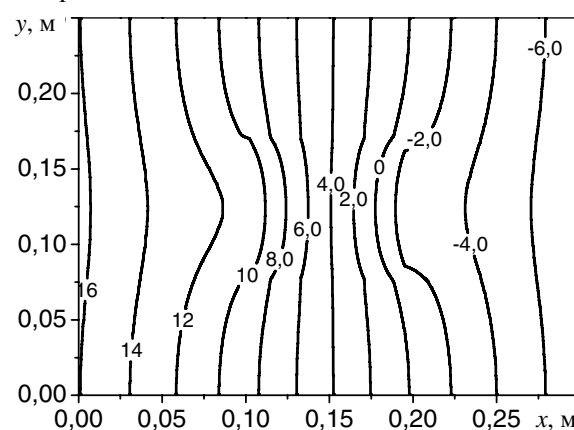


Рис. 4. Изотермы в поперечном сечении неоднородного керамзитобетонного фрагмента при $\tau_{im}=168$ ч

Поведение изотерм в поперечном сечении неоднородного керамзитобетонного фрагмента на рис. 4 показывает, что максимальное возмущение температурного поля происходит на границе утеплителя с керамзитобетоном. Наличие утеплителя приводит к повышению температуры на оси неоднородного керамзитобетонного фрагмента для всех x из диапазона $[0, X_k/2]$ и понижению температуры — из диапазона $[X_k/2, X_k]$.

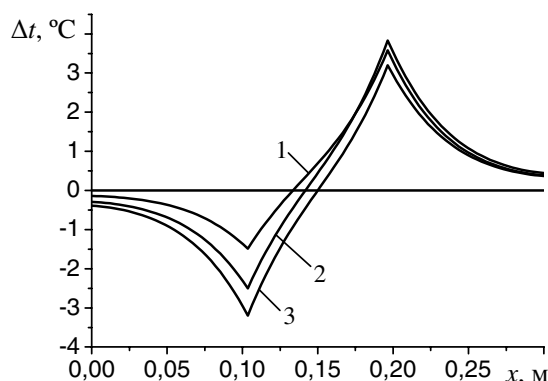


Рис. 5. Распределение перепадов температур на периферии $y = Y_k$ и оси $y = Y_k/2$ в зависимости от x в различные моменты времени τ , ч: 1) 0,5; 2) 1; 3) 168

Из анализа рис. 5 следует, что максимальные перепады температур наблюдаются в плоскостях контакта утеплителя с керамзитобетоном. После выхода системы на стационарный режим теплопередачи

(кривая 3) абсолютные значения перепадов температур в этих плоскостях выравниваются и составляют примерно $3,2^{\circ}\text{C}$. Абсолютные значения экспериментальных перепадов температур в рассматриваемых сечениях (рис. 3) составляют около $3,4^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, на основе численного и экспериментального исследования установлено, что в центре неоднородного фрагмента располагается сечение с максимальным значением трансмиссионной теплоты, до которого теплота от оси фрагмента отводится на его периферию, а после которого, наоборот, подводится с периферии к оси фрагмента.

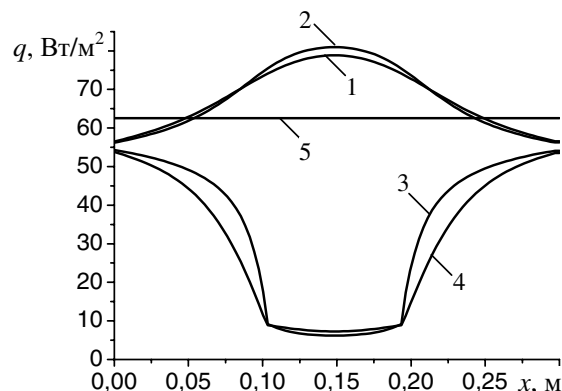


Рис. 6. Распределение плотностей тепловых потоков по x для утепленного (1–4) и однородного (5) керамзитобетонных фрагментов в конечный момент времени $\tau=168$ ч в различных сечениях по y : 1, 5) $y=Y_k$; 2) $y=7Y_k/8$; 3) $y=3Y_k/5$; 4) $y=Y_k/2$

Как видно из рис. 6 кривые распределения плотностей тепловых потоков в однородном и в утепленном керамзитобетонных фрагментах стены при установившемся режиме теплопередачи существенно отличаются друг от друга. При этом величина плотности теплового потока q для однородной керамзитобетонной стены толщиной $0,3$ м составляет примерно $62,6$ Вт/м². Плотности тепловых потоков в сечениях y , проходящих через утеплитель имеют минимумы, а в сечениях, проходящих через керамзитобетон — максимумы, находящиеся в центре керамзитобетонного фрагмента. Это объясняется большим термическим сопротивлением утеплителя, чем керамзитобетона. Тепловой поток, проходящий через неоднородный фрагмент стены при «столкновении» с утеплителем вынужден огибать его по пути наименьшего сопротивления. Поэтому через утеплитель в центре неоднородного фрагмента будет проходить меньший тепловой поток (кривые 3, 4), чем через керамзитобетон (1, 2), причем величина плотности теплового потока в сечении $y=7/8 Y_k$ немного больше, чем в сечении $y=Y_k$. Это можно объяснить большей концентрацией изотерм вблизи теплоизоляционной вставки и их рассеиванием по мере удаления от оси фрагмента к периферии. Разница в величинах плотностей тепловых потоков на наружной и внутренней поверхностях стены в сечениях, проходящих через утеплитель и керамзитобетон составляет около 5 %.

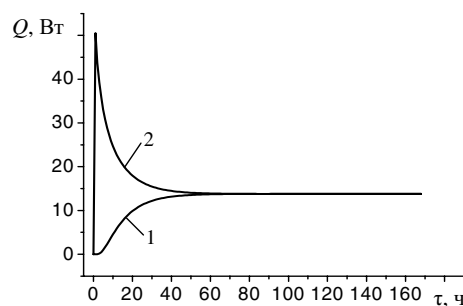


Рис. 7. Тепловые потери через внутреннюю (1) и наружную (2) поверхности утепленного керамзитобетонного фрагмента стены при $t_m=20^{\circ}\text{C}$

Исследование теплозащитных свойств неоднородного керамзитобетонного фрагмента показывает (рис. 7), что при задании начального условия $t_m=25,5^{\circ}\text{C}$ тепловые потери через наружную поверхность утепленного керамзитобетонного фрагмента (кривая 2) вначале резко растут, достигая при $\tau \approx 1$ ч максимального значения $50,5$ Вт, а затем уменьшаются, стремясь к стационарному значению. Тепловые потери через внутреннюю поверхность фрагмента стены (кривая 1) с самого начала постоянно медленно растут, также асимптотически стремясь к своему стационарному значению только снизу. После выхода процесса теплопереноса на стационарный режим тепловые потери через внутреннюю и наружную поверхности фрагмента уравниваются, что служит одним из подтверждений достоверности расчетов. При этом тепловые потери через утепленный керамзитобетонный фрагмент при установлении стационарного режима составляют примерно $13,7$ Вт. Для сравнения тепловые потери через однородный фрагмент равны $18,8$ Вт.

Анализ полученных результатов показывает, что применение монолитно возводимых стен с пустотами, заполненными утеплителем, с теплотехнической точки зрения выгодно. Вместе с тем расчет термического сопротивления рассматриваемых в работе керамзитобетонных наружных стен указывает на необходимость их дополнительного утепления в районах с холодными климатическими условиями. Это возможно путем устройства различных фасадных систем утепления с декоративной отделкой [6].

Таким образом, проведенное численное и экспериментальное исследование тепловых режимов неоднородной керамзитобетонной стены выявило в ней закономерности распределения перепадов температур и тепловых потоков. Разработанная численная технология позволяет прогнозировать тепловое состояние наружных неоднородных керамзитобетонных стен в холодных климатических условиях с различными теплофизическими и геометрическими характеристиками керамзитобетона и утеплителя и более рационально подходить к выбору систем их дополнительного наружного утепления.

Работа выполнена по программе Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы» (Подпрограмма 2. Прикладные исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники), код проекта 7756.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Теплозащитные свойства неоднородных керамзитобетонных наружных стен зданий // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 7. – С. 18–20.
2. Пат. на ПМ 47034 РФ. МПК⁷ E04G 11/08. Монолитная бетонная стена (варианты) / А.В. Колесникова, А.Н. Хуторной, Н.А. Цветков, А.Я. Кузин. Заявлено 14.03.2005. Опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22. – 2 с.: 1 ил.
3. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 195 с.
4. Гришин А.М., Берцун В.Н. Итерационно-интерполяционный метод и теория сплайнов // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 214. – № 4. – С. 751–754.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1970. – 376 с.
6. Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Эффективность теплозащитных свойств керамзитобетонных наружных стен зданий // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 9. – С. 10–15.

УДК 621.791.75.037

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ В ЩЕЛЕВУЮ РАЗДЕЛКУ

Д.А. Чинахов, В.Т. Федько, О.Г. Брунов, Ю.Н. Сараев*

Юргинский технологический институт ТПУ

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: zver73@rambler.ru

Рассматривается проблема сварки легированных высокопрочных сталей в щелевую разделку. Изложены результаты сравнительных исследований образцов из стали 30ХГСА, выполненных разными способами импульсной дуговой сварки. Установлено, что способ сварки с импульсной подачей электродной проволоки имеет ряд преимуществ и обеспечивает надежное качество формирования шва и работоспособность соединений с щелевой разделкой.

Легированные высокопрочные стали обладают высоким комплексом эксплуатационных свойств и используются для производства ответственных сварных конструкций [1, 2]. Они обеспечивают высокую прочность конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости. Однако, при сварке стали данного класса склонны к закалке и образованию холодных трещин. Под воздействием термического цикла сварки в зоне термического влияния (ЗТВ) формируются закалочные структуры, характеризующиеся большим значением твердости и малой вязкостью. Поэтому на зону сплавления и ЗТВ приходится наибольший процент образования холодных трещин [3].

Для предотвращения образования холодных трещин зачастую прибегают к дополнительным операциям, усложняющим технологический процесс и увеличивающим количество затрат на изготовление сварных конструкций. В отечественной и зарубежной практике для этой цели широко применяют предварительный подогрев и последующую термообработку. Такая технология сварки позволяет, в некоторой степени, снизить уровень содержания диффузионного водорода в сварном соединении, скорость охлаждения металла шва и ЗТВ и увеличить время протекания структурных превращений [4–6].

Однако, эта технология сложна и нерациональна, поскольку требует тщательного контроля температуры и режимов сварочного процесса, а неравномерность подогрева и термической обработки крупногабаритных изделий ведет к возрастанию внутренних напряжений и деформаций. Кроме то-

го, применение предварительного подогрева и термообработки связано с дополнительными энергетическими и трудовыми затратами [6–8].

Необходимо также учитывать, что легированные высокопрочные стали (30ХГСА, 25ХГСА, 12Х2НЧА и др.) чувствительны к концентраторам напряжений, особенно после обычной закалки и отпуска, а также подвержены охрупчиванию в результате насыщения водородом [2], что при высоких внутренних напряжениях или циклической нагрузке может служить причиной зарождения холодных трещин и привести к разрушению сварной конструкции.

Насыщение металла шва водородом происходит в результате длительного пребывания сварочной ванны в жидкой фазе. Сократить это время можно при помощи управления переносом электродного металла в сварочную ванну. В настоящее время разработаны и применяются различные способы сварки с управляемым переносом электродного металла. Каждый способ обладает своими достоинствами и недостатками [9]. С другой стороны, увеличенное время пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии способствует лучшему перемешиванию электродного металла с основным, что приводит к снижению уровня структурной и механической неоднородности в зоне сплавления [10].

Цель настоящей работы определить способ дуговой сварки плавлением, обеспечивающий требуемое качество формирования шва и работоспособность сварных соединений легированных высокопрочных сталей с щелевой разделкой.